

津波作用を受ける道路橋の被害率曲線の構築とその利活用

Development of fragility curve for girder-type road bridges subject to a tsunami wave load and its implementation

○中村 友治¹, 庄司 学², 高橋 和慎³, 石川 尚樹⁴Tomoharu NAKAMURA¹, Gaku SHOJI², Kazunori TAKAHASHI³
and Naoki ISHIKAWA⁴¹筑波大学 大学院 システム情報工学研究科

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

²筑波大学 システム情報系

Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba

³筑波大学 大学院 システム情報工学研究科

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

⁴筑波大学 大学院 システム情報工学研究科

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

We assess the tsunami damage on road bridges due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake tsunami. For damage assessment of bridges, we obtain the inundation heights at 144 subject bridges by observed data and tsunami flow simulations. We clarified damage ratio dependent on an inundation depth calculated by an inundation height, which is defined by the value of number of bridge damage points divided by total number of exposed bridges, focusing on wash-away girder-type bridges. Finally, we develop the fragility curve of wash-away damage for girder-type road bridges and show how to use the fragility curve for regional damage assessment of road infrastructures in Natori city, Iwanuma city, Watari town and Yamamoto town in Miyagi Prefecture.

Keywords : the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake and tsunami, road infrastructure, bridge, tsunami damage, damage function

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、これに伴う巨大津波により道路橋に甚大な被害が発生した。このような道路橋の被害は復旧活動に甚大な影響を与えるため、発生が蓋然的に予期される巨大地震津波に対して防災施策立案の事前作業となる道路橋の被害推計が必要となる。したがって、道路橋の津波に関わる被害推計の要素技術である被害率曲線の構築がなされている(例えば、文献 1))。以上より本研究では、東北地方太平洋沖地震津波において発生した道路橋の落橋被害に焦点を当て、浸水深を指標とした橋梁の被害率曲線を構築する。構築された被害率曲線を地域レベルの道路網に適用する一例として宮城県の名取市、岩沼市、亘理町及び山元町に敷設された橋梁の津波被害想定に関する方法論を示す。

2. 分析対象とする橋梁と分析方法

本研究では、庄司ら²⁾によって示された東北地方太平洋沖地震において津波作用を受けたと考えられる230の橋梁から桁橋構造で桁まで津波が作用したと考えられる144の道路橋を分析対象とする。文献 2)ではこれら144の道路橋の中で29の道路橋において津波作用により発生した被災モードが示されており、これらの中で被災モードが落橋とされる17の道路橋を分析する。図1には、これらのデータの地点、浸水域³⁾、橋梁位置での浸水高の推定値及び浸水高の観測値⁴⁾の関係を示す。これらのデ

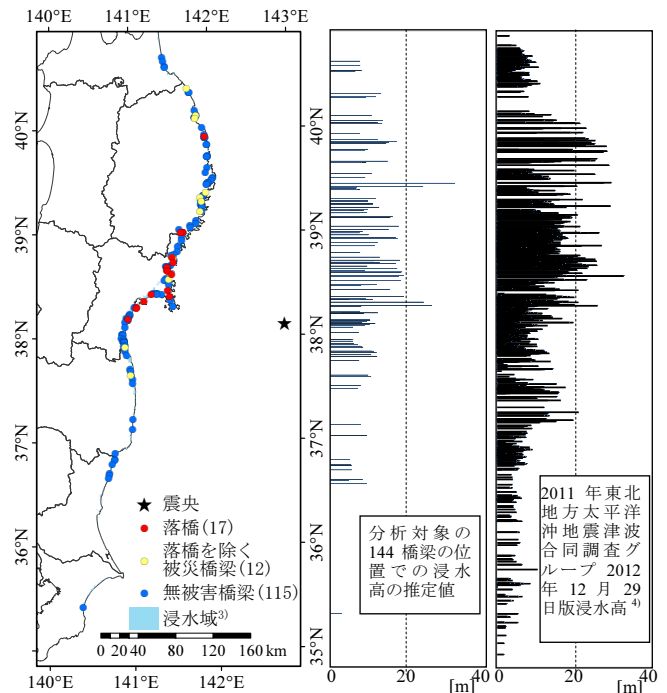
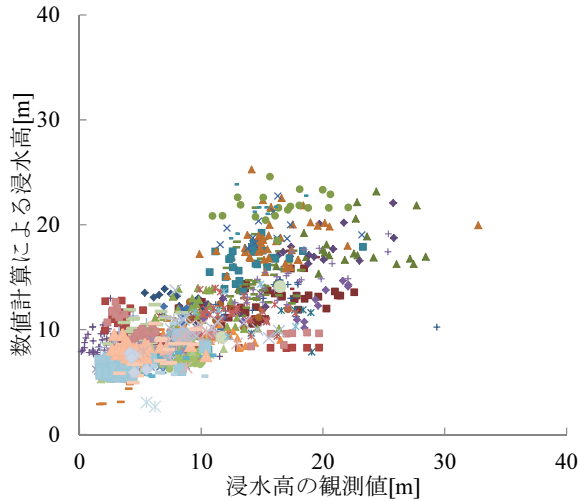


図1 分析対象橋梁の位置、それらの位置での浸水高の推定値及び文献 4) で示された浸水高の観測値

ータを基に、落橋に関する被害率 R_N^b として落橋数 N_{fId}^b を対象橋梁数 N_t^b で除して式(1)のように定義した。



- ◆ Group01(15) ■ Group02(34) ▲ Group03(26)
- × Group04(7) ● Group05(9) + Group06(22)
- Group07(9) - Group08(45) ◆ Group09(23)
- Group10(27) ▲ Group11(43) × Group12(12)
- × Group13(7) ● Group14(20) + Group15(87)
- Group16(9) - Group17(21) ◆ Group18(22)
- Group19(52) ▲ Group20(47) × Group21(3)
- + Group22(21) ◆ Group23(11) ▲ Group24(31)
- × Group25(21) × Group26(39) ● Group27(36)
- + Group28(26) + Group29(15) - Group30(27)
- Group31(40) ▲ Group32(46) × Group33(64)
- Group34(60) ■ Group35(46) ▲ Group36(53)
- × Group37(18) × Group38(13) ● Group39(2)
- × Group40(9) + Group41(8) - Group42(8)
- Group43(17) ◆ Group44(5) × Group45(2)

注：括弧内は各計算Groupで比較した観測点の数

図2 数値計算による浸水高と浸水高の観測値との関係

$$R_N^b = \frac{N_{fd}^b}{N_t^b} \quad (1)$$

津波作用の指標としては浸水深を使用する。浸水深は各橋梁位置での浸水高から河川水面における標高を差し引くことで算出する。東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ⁴⁾の2012年12月29日時点での浸水高の観測値の中で測量誤差が小さいとされる信頼度B以上のデータが各対象橋梁から250m以内に存在する場合は、最近傍の浸水高の観測値を各橋梁位置での浸水高であると仮定した。それら以外の橋梁では、対象橋梁位置での浸水高を次章で示す数値シミュレーションによって算出する。これにより分析対象となる橋梁位置の浸水高は、数値計算の結果を基にした112データと観測記録を基にした32データの計144データを用いて推定される。

3. 分析対象となる橋梁位置での浸水高の推定

分析対象となる橋梁位置における浸水高の推定では、東北大学により開発された津波プログラムTUNAMI-CODE (Tohoku University's Numerical Model for Investigation of Tsunami)⁵⁾を用いて津波の伝播及び浸水に関する数値シミュレーションにより計算する。支配方程式は浅水理論に基づいた以下の式(2a)-(2c)のようになり、格子配置はStaggered格子を採用し leap-frog 差分法により計算を実施した。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \end{aligned} \quad (2b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \end{aligned} \quad (2c)$$

式(2a)-(2c)において η は海面を基準とした津波波高であり、 M は東西方向である x 方向の流量フラックス、 N は南北方向である y 方向の流量フラックス、 D は津波波高 η と静水深の和である全水深である。 g は重力加速度、 ρ は海水の単位体積質量である。また、 n はManningの粗度係数であり、全計算で一様に0.025としている。数値計算は112の分析対象の橋梁を45の計算Groupに分割して行い、それら毎に計算領域を6段階に設定して計算した。陸域における標高データとして、広域4領域(Region1~Region4)でGEBCO30⁶⁾のデータ、狭域2領域(Region5,Region6)で国土地理院提供の数値標高モデル(10m間隔)⁷⁾を利用した。海域における水深データとして、広域1領域(Region1)でGEBCO30のデータ、狭域5領域(Region2~Region6)で日本水路協会の海底地形デジタルデータM7000シリーズ(1m間隔等高線)⁸⁾を利用した。これら標高と水深のデータを各領域でKriging法で補間した。波源モデルとしてはFujii *et al.*⁹⁾により提案されたモデルを利用し、初期水位はOkada¹⁰⁾の方法により静的に与えた。計算時間は、各ステップの刻み幅を0.10秒とし、総計算時間は計算Group毎に120分から240分と設定した。

数値計算による浸水高と浸水高の観測値との関係を図2に示す。また、津波シミュレーションの妥当性を文献11)によって示された K_i から算出される K と κ を指標として評価した。 K_i は各観測点での浸水高の観測値を数値計算により得られたその観測点での浸水高で除した値である。 K は K_i の対数平均であり計算による平均的な補正倍率を表し、 κ は K_i の対数標準偏差であり平均値 K に対する変動の割合を表す。今回の数値計算モデルを各計算領域において分析対象となる橋梁の近傍に存在する1,233点での浸水高の観測値と比較し、 K は0.924、 κ は1.233となった。これらの値は共に1に近い値であるほど精度が良いとされ、相田¹²⁾は K が0.92以上、文献11)は κ が1.45以下のモデルが精度良く実際の津波の伝播及び浸水を再現したモデルとしている。これらの比較検討に基づき、各橋梁地点での数値計算による浸水高がそれぞれの地点での浸水高として妥当であると考え、以降の分析でこれらの値から浸水深を算出する。

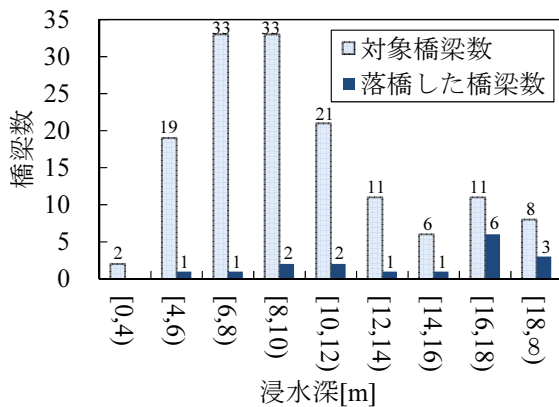


図3 浸水深による対象橋梁及び落橋のヒストグラム

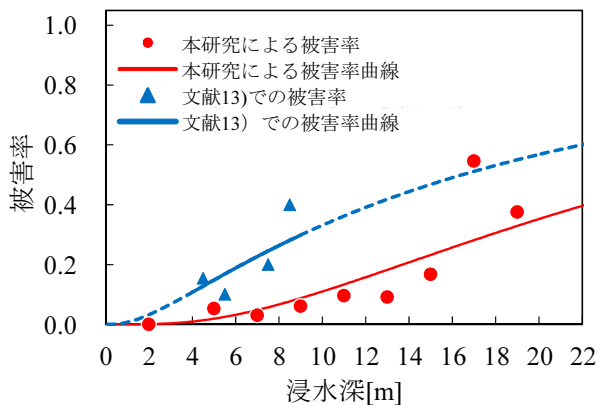


図4 落橋に関する被害率と被害率曲線

表1 被害率曲線のパラメータ

	本研究	文献13)
対数平均値 μ_Y	3.32	2.8
対数標準偏差 σ_Y	0.82	1.14
決定係数 R^2	0.68	0.79
期待値 [m]	38.72	31.49
標準偏差 [m]	38.22	51.44
中央値 [m]	27.55	16.37

4. 被害率の算出と被害率曲線の構築

浸水深毎の対象橋梁数及び落橋した橋梁数のヒストグラムを図3に示す。対象橋梁数は浸水深 6.0m~8.0m 及び 8.0m~10.0m で 33 橋梁と最大となり、落橋した橋梁数は浸水深 16.0m~18.0m で 6 橋梁と最大となった。このヒストグラムから式(1)を用いて被害率 R_N^b を算出し、被害率 R_N^b と浸水深の関係を図4に示す。浸水深 2.0m までは被害率 R_N^b は 0 を示し、浸水深 5.0m から被害率が立ち上がり始める。浸水深 5.0m~13.0m の領域で被害率 R_N^b は線形的に増加している。浸水深 15.0m で被害率 R_N^b は 0.17 と増加し、浸水深 17.0m で被害率 R_N^b は 0.55 と急激に増加して最大値を示した。被害率 R_N^b が最大値 0.55 を示した地域は川原川橋、気仙大橋、歌津大橋、水尻橋及び横津橋の周辺であった。

被害率曲線の構築に際しては、浸水深 z における被害率 $R(z)$ が標準正規分布の累積確率 $\Phi(z)$ を用いて、対数正規分布で式(4)のようにモデル化されると仮定した。

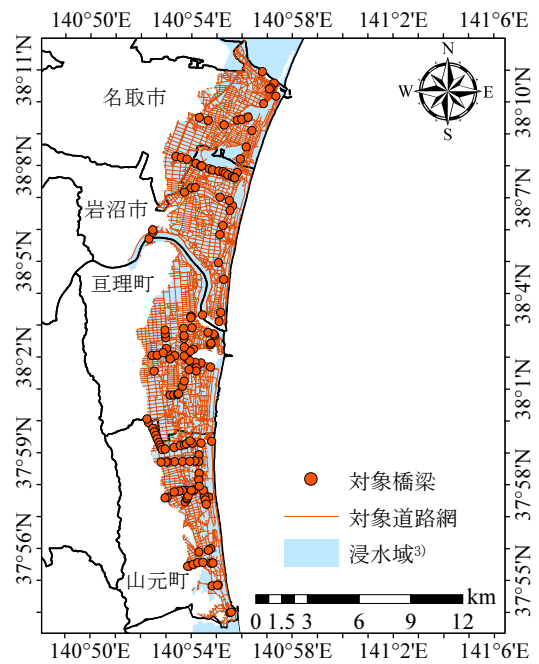


図5 分析対象とする道路網及び橋梁

$$R(z) = \Phi\left(\frac{\ln z - \mu_Y}{\sigma_Y}\right) \quad (4)$$

ここで、 μ_Y と σ_Y は $\ln z$ の期待値と標準偏差である。回帰定数は対数確率紙を用いて最小二乗法による線形回帰直線によりそれぞれ算出した。浸水深の各区間における代表値は 4.0m~18.0m の区間では中央値を使用しているが、4.0m 未満の区間では 2.0m とし、18.0m 以上の区間では 19.0m とした。構築した被害率曲線及び Shoji and Moriyama¹³⁾ が構築した被害率曲線とそれらの被害率データを図4に併せて示し、表1にそれぞれの被害率曲線の算定に際する回帰定数を示す。文献13)は2004年インド洋大津波の際のスリランカにおける道路橋の桁橋の落橋被害データを基に分析を行っている。

図4において文献13)の被害率曲線が点線で表示している領域は、これまで被害率データが存在しないため精度が保障できなかった領域である。本研究ではこれらの領域において被害率のデータ及び被害率曲線を示すことができた。また、本研究における被害率は文献13)の被害率に比べ低い値を示した。これは本研究で対象とした橋梁が耐震設計されている我が国の橋梁であるので、文献13)で扱ったスリランカの橋梁より津波作用に対しても抵抗力が大きかったためであると推察される。

5. 津波ハザードが高い地域の道路網の津波被害推計

津波ハザードが高い地域の防災施策の立案の前提となる被害推計において、構築した被害率曲線を活用する方法論を以下に示す。本研究では一例として宮城県の名取市、岩沼市、亶理町及び山元町までの国道、県道及び市道からなる道路網を対象とした場合の適用方法を示す。津波作用として東北地方太平洋沖地震津波と同一の浸水を想定し、分析対象となる道路網として国土地理院の数値地図2500¹⁴⁾を基に津波浸水域内に存在する道路網を抽出した(図5)。また、この図にそれら道路上に存在する分析対象とする153の道路橋の位置を併せて示す。これら

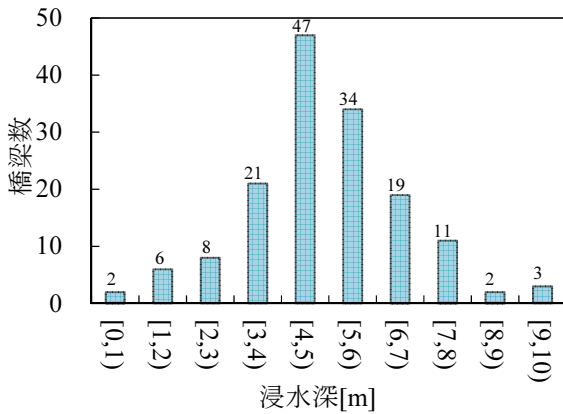


図6 対象橋梁の浸水深についてのヒストグラム

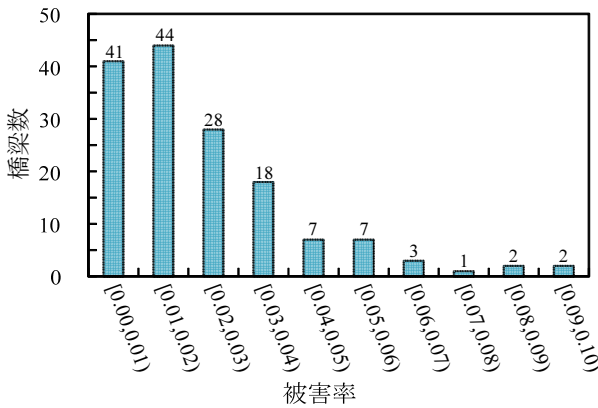


図7 浸水深による対象橋梁及び落橋のヒストグラム

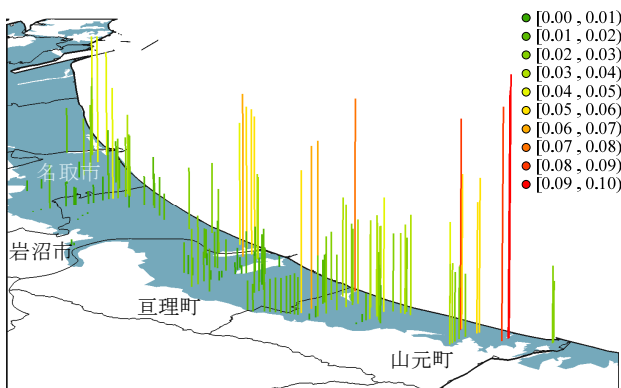


図8 各橋梁での被害率の空間分布

の対象橋梁位置において津波シミュレーションを用いて浸水高を算出し、浸水高から津波シミュレーションで用いた橋梁位置での標高を差し引くことで浸水深を推定する。対象橋梁における推定した浸水深のヒストグラムを図6に示す。

対象となる153の道路橋位置における推定された浸水深を基に図4に示した被害率曲線を適用する。推定した被害率のヒストグラムを図7、各橋梁の被害率の空間分布を図8に示す。本試算で適用した事例では被害率が0.08以上と比較的高い4橋梁は山元町の海岸線に集中した。算出された被害率は道路網のリンクが切断される確率であるので、津波災害時において地域に敷設された道路網の機能障害の程度を数値試行により評価し、津波対策の優先順位づけ等の防災施策に活用することができる。

6. まとめ

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震津波において発生した道路橋の落橋被害に焦点を当て浸水深を指標として被害率曲線を構築した。また、構築された被害率曲線を津波ハザードに曝される道路網上の橋梁の防災施策の立案に利活用する方法論を示し、その一例として宮城県名取市、岩沼市、亶理町及び山元町の道路網に被害率曲線を適用した。

謝辞

本研究で使用した数値計算につきましては東北大学により開発されたプログラムを利用させて頂き、同大学の今村文彦先生及び越村俊一先生には貴重なご助言を頂きました。同数値計算の実行に際して元筑波大学の高橋宏允氏にご協力頂きました。また、本研究は、筑波大学プロジェクト「巨大地震による複合災害の統合的リスクマネジメント」（研究代表者：八木勇治准教授、研究分担者：庄司学）の助成を得て実施されました。更に、本研究は、文部科学省・都市防災プロジェクト「都市災害における災害対応能力の向上方策に関する調査・研究」（研究代表者、京都大学・林春男教授）の一部助成を得て実施され、特に、「被災者ニーズを踏まえたライフライン被害・復旧情報の体系化」研究グループ（研究代表者、岐阜大学・能島暢呂教授）のメンバーの方々からは貴重な御助言等を多々頂戴しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、中村友治、庄司学、高橋和慎：津波被害想定に活用するための津波作用に関する橋梁の被害率曲線の構築とその利活用、東日本大震災特別論文集、No.1, pp.59-62, 2012.
- 2) 庄司学、中村友治、高橋和慎、櫻井俊彰：2011年東北地方太平洋沖地震において津波作用を受けた道路構造物の被害、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、Vol.68, No.4, pp.1_1300-1306, 2012.
- 3) 国土地理院：10万分1浸水範囲概況図、<http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku60003>
- 4) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ：痕跡調査結果、<http://www.coastal.jp/tjt/>
- 5) Disaster Control Research Center (DCRC), Tohoku University: TUNAMI-CODE Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of tsunami, 2009.
- 6) The General Bathymetry Chart of the Oceans (GEBCO), 2009, <http://www.gebco.net/>
- 7) 国土地理院：基盤地図情報数値標高モデル、<http://saigai.gsi.go.jp/fgd/download/download.html>
- 8) 日本水路協会：海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ, 2011.
- 9) Fujii, Y., Satake, K., Sakai, S., Shinohara, M. and Kanazawa, T.: Tsunami Source of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, Vol.63, pp.848-820, 2011.
- 10) Okada, Y.: Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.75, pp.1135-1154, 1985.
- 11) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会：原子力発電所の津波評価技術, 2002, <http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/node/5>
- 12) 相田勇：東海道沖におこった歴史津波の数値実験, 地震研究所彙報, Vol.56, pp.367-390, 1981.
- 13) Shoji, G. and Moriyama, T.: Evaluation of the Structural Fragility of a Bridge Structure Subjected to a Tsunami Wave Load, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol.29, No.2, pp.73-81, 2007.
- 14) 国土地理院：数値地図2500（空間データ基盤）, 2006.